

## 発明の名称

光増幅モジュール、光増幅器及び光通信システム

## 発明の背景

## 発明の分野

- 5        この発明は、信号光を増幅する光増幅モジュール、光増幅器、及び該光増幅器を含む光通信システムに関するものである。
- 

## 関連する背景技術

- 10        波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）光通信システムは、所定の信号波長帯域に含まれる複数チャネルが多重化された信号光（多重化信号光）を送信するシステムであり、大容量情報の高速送受信を可能にする。また、WDM光通信システムでは、送受信可能な情報量の更なる大容量化を図るべく、Cバンド（1530nm～1565nm）に含まれる多重化信号光だけでなく、Lバンド（1565nm～1625nm）に含まれる多重化信号光をも用いることが検討されている。

- 15        これに対応し、光通信システムに適用される光増幅器は、Cバンドの信号光増幅のみならず、Lバンドの信号光増幅もその実現が要求されている。このような光増幅器としては、光増幅媒体として、光導波領域にEr元素が添加された石英系ホストガラスからなる光ファイバ（EDF: Erbium Doped Fiber）が適用された光増幅器（EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier）が知られている。この  
20        光増幅器では、Er元素を励起し得る波長（1.48μm又は0.98μm）の励起光がEDFに供給され、このEDFにおいてCバンド又はLバンドの信号光が増幅される。

- 25        例えば、A. Mori, et al., ECOC1997, Tech. Dig., p.135（文献1）に記載された光増幅器では、Alが共添加された石英系EDFが光増幅媒体として適用されており、平坦な利得が1600nm付近の長波長側まで得られる。しかしながら、この光増幅器において、Lバンドの多重化信号光を一括増幅するには、利得

が平坦な波長帯域幅が狭い。また、上記文献1には、更に長波長側まで平坦な利得を得るべく、光増幅媒体としてテルライト系ホストガラスからなるEDFが適用された光増幅器が提案されている。しかしながら、テルライトガラスは熱損傷の危険があることから、この光増幅器は実用的では無い。

5        また、A. J. G. Ellison, et al., OFC2001, TuA2 (文献2) に記載された光増幅器では、光増幅媒体として、Sb元素を含む多成分の石英系EDFが適用されている。しかしながら、Sb元素は有毒であることから、この光増幅器は実用的では無い。

10        さらに、熱損傷や毒性の問題が無いという点で、光増幅媒体として実用的な石英系EDFが適用された光増幅器も提案されている。例えば、I. P. Byriel, et al., ECOC2001, Tu.L. 3.5 (文献3) に記載された石英系EDFの組成は不明であるが、角井他、電子情報通信学会総合大会、C-3-28、2002 (文献4) や S. Tanaka, et al., OFC2002, Tech. Dig., ThJ3 (文献5) に記載された石英系EDFはP元素及びAl元素が共添加されている。これらの文献3～5に記載されたEDFでは、利得が1620nm付近の長波長側まで得られている。しかしながら、波長1580nm付近で利得が顕著に小さく、WDM伝送において重要な利得平坦度が損なわれている。

20        ここで、EDFの利得スペクトルの利得平坦度は、図1で説明される相対利得偏差により評価され得る。図1は、EDFの相対利得偏差を説明するための典型的な利得スペクトルある。この図1に示されたように、EDFの利得スペクトルは、利得を有する波長帯域内において大略的に見れば2つの利得極大値と1つの利得極小値とを有する。利得極小値を $G_{min}$  (dB) とし、利得最大値 $G_{max}$  (dB) と利得極小値 $G_{min}$ との差を $\Delta G$ とする。そして、差 $\Delta G$ と利得極小値 $G_{min}$ との比 $(\Delta G / G_{min})$ で相対利得偏差を表す。また、利得極小値 $G_{min}$ 以上  
25        の利得が得られている波長帯域を実効的信号波長域と呼ぶ。

以上のように定義された相対利得偏差により利得平坦度を評価すると、文献3

に記載されたEDFの相対利得偏差は25%程度であり、文献4に記載されたEDFの相対利得偏差は30%を超え、文献5に記載されたEDFの相対利得偏差は25%程度である。EDFの相対利得偏差が大きすぎると、利得を等化するために挿入される光フィルタの挿入損失は大きくならざるを得ず、励起効率の劣化や雑音指数の劣化を惹起する。

例えば、陸上幹線系で一般に要求される光増幅器の利得は30dB程度である。

この光増幅器に適用されるEDFの相対利得偏差を25%とする。陸上幹線系において、光増幅器はEDFに加えて分散補償光ファイバをも内蔵するのが一般的であり、この分散補償光ファイバの損失は典型的には10dB程度である。また、光増幅器には、その他の受動光部品（例えば、光カップラ、光アイソレータ、等）が挿入され、これら受動光部品の挿入損失の合計は6dB程度である。このとき、EDFが実現すべき利得は46dB（=30dB+10dB+6dB）にも達する。また、EDFの相対利得偏差が25%であることから、利得を等化するために挿入される光フィルタのピーク挿入損失は、11.5dB（=46dB×0.25）にもなり、分散補償光ファイバの損失に匹敵するほどの大きさとなる。このことは、励起効率や雑音指数に大きな悪影響を与えることになる。

ところで、既に普及しているCバンド用光増幅器において、EDFの相対利得偏差は、その石英系EDFに共添加される元素の種類や濃度に依存するが、13～19%程度である。図2は、A1共添加石英系EDFの利得スペクトルである。なお、この図2において、グラフG2010はA1共添加濃度が1重量%のときの利得スペクトル、グラフG2020はA1共添加濃度が2.5重量%のときの利得スペクトル、グラフG2030はA1共添加濃度が3.5重量%のときの利得スペクトル、及び、グラフG2040はA1共添加濃度が5重量%以上のときの利得スペクトルが、それぞれ示されている。この図2から分かるように、A1共添加濃度が大きいほど、EDFの相対利得偏差が小さく、EDFの相対利得偏差は13～19%程度である。そこで、Lバンド用光増幅器でも、EDFの相対

利得偏差は、この程度の値が目標値となる。

#### 発明の概要

発明者らは、従来の光増幅器について検討した結果、以下のような課題を発見した。すなわち、文献1に記載された光増幅器は、光増幅媒体として熱損傷の危険があるテルライト系ホストガラスからなるEDFが適用されており、実用的では無い。文献2に記載された光増幅器は、光増幅媒体として毒性を有するSb元素を含む多成分の石英系EDFが適用されており、やはり実用的では無い。また、文献3～5それぞれに記載された光増幅器は、光増幅媒体として熱損傷や毒性の問題が無いという点で実用的な石英系EDFが適用されているが、EDFの相対利得偏差が大きく、励起効率や雑音指数に大きな悪影響を与える懸念がある。

この発明は、上述のような課題を解決するためになされたものであり、Lバンドにおいて相対利得偏差の小さい広帯域利得スペクトルを実現する実用的な光増幅モジュール、該光増幅モジュールを含む光増幅器、さらには、該光増幅器を含み、大容量情報の送受信を可能にする光通信システムを提供することを目的としている。

この発明に係る光増幅モジュールは、波長1610nm以上の波長域を含む信号波長帯域の複数チャネルが多重化された信号光（多重化信号光）を一括増幅すべく、酸化Bi系ホストガラスからなるBi系光導波路と、励起光供給システムを備える。上記Bi系光導波路は、上記信号光が伝搬する領域であってEr元素が添加された光導波領域を有する。また、上記励起光供給システムは、Bi系光導波路の光導波路領域内に反転分布を生じさせるべく、所定波長の励起光を該Bi系光導波路に供給する。また、この発明に係る光増幅器は、上述のような構造を備えた光増幅モジュール（この発明に係る光増幅モジュール）を含み、Lバンドに含まれる多重化信号光を該光増幅モジュールにより増幅する。さらに、この発明に係る光通信システムは、上述のような構造を有する光増幅器（この発明に係る光増幅器）を含み、Lバンドに含まれる多重化信号光を伝送するとともに、

この多重化信号光を該光増幅器により一括増幅する。

この発明に係る光増幅モジュールでは、励起光が供給されることにより  $E_r$  添加  $B_i$  系光導波路の光導波領域内に反転分布が生じ、該光導波領域内を伝搬する多重化信号光（波長  $1610\text{ nm}$  以上の波長域を含む信号波長帯域の複数チャネルが多重化されている）が増幅される。また、このような光増幅モジュールを含む光増幅器では、 $L$  バンドに含まれる多重化信号光が増幅される。さらに該光増

幅器を含む光通信システムでは、 $L$  バンドに含まれる多重化信号光が伝送されるとともに、光増幅器により増幅される。このように当該発明によれば、光増幅媒体として  $E_r$  添加  $B_i$  系光導波路が適用されているので、熱損傷や毒性の問題が無く実用的であり、また、 $L$  バンドに含まれる広帯域の実効的信号波長域に亘って相対利得偏差を小さくすることができる。

なお、この発明に係る光増幅モジュールにおいて、 $E_r$  元素が添加された上記  $B_i$  系光導波路の光導波領域には、 $B$  元素がさらに添加されてもよい。長波長側の蛍光特性が改善され、ガラスファイバを利用した光ファイバネットワークの構築が容易になるからである。

この発明に係る光増幅モジュールは、励起光供給システムから  $B_i$  系光導波路に供給される励起光の光パワーを調節する制御部を備えるのが好ましい。この制御部は、当該光増幅モジュールの全動作温度において、あるいはいずれかの動作温度において、 $B_i$  系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が  $25\%$  未満、さらには  $19\%$  未満になるよう上記励起光の光パワーを調節する。

上記制御部は、当該光増幅モジュールの全動作温度範囲内において、 $B_i$  系光導波路の正味利得スペクトルの相対利得偏差が  $25\%$  未満となる波長帯域幅が  $37\text{ nm}$  を越えるよう、さらには  $50\text{ nm}$  を越えるよう上記励起光の光パワーを調節してもよい。また、上記制御部は、当該光増幅モジュールの全動作温度範囲内において、 $B_i$  系光導波路の正味利得スペクトルの相対利得偏差が  $19\%$  未満となる波長帯域幅が  $37\text{ nm}$  を越えるよう、さらには  $50\text{ nm}$  を越えるよう上記励

起光の光パワーを調節してもよい。

この発明に係る光増幅モジュールは、利得平坦度のフィードバック制御のため、B i 系光導波路又はその近傍の温度を検出する温度検出素子をさらに備えてもよく、また、該B i 系光導波路又はその近傍の温度を調整する温度調整素子をさらに備えるのが好ましい。この場合、利得の温度依存性が大きいB i 系光導波路又はその近傍の温度は、温度検出素子により検出され、あるいは、温度調整素子により調整される。

なお、この発明に係る光増幅器は、上述のような構造の光増幅モジュール（この発明に係る光増幅モジュール）と制御部を備える。

特に、上記制御部は、当該光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB)に基づいて、該光増幅モジュールのB i 系光導波路又はその近傍の温度を $\Delta T$  (K)だけ変化させる。これによりスパンロスなどの変動に起因した動作利得の変動が余儀なくされたとしても、余分な光部品なしに利得平坦度の維持が可能になる。なお、利得変動の検出のため、この発明に係る光増幅器は、当該光増幅器における入力及び出力の少なくともいずれかをモニタリングすることにより、動作利得を検出するパワーモニタをさらに備えてもよい。また、利得変動の検出のため、この発明に係る光増幅器は、当該光増幅器における入力及び出力の少なくともいずれかをモニタリングすることにより、利得傾斜を検出するオプティカルパフォーマンスモニタを備えてもよい。さらに、このような構造の光増幅器を含む光通信システムでは、利得変動の検出のため、上位監視システムとを備えてもよい。

上記制御部は、 $\pm 1$  dB程度の高精度で利得平坦度を維持すべく、例えば以下のような制御を行う。すなわち、当該制御部は、B i 系光導波路単体の $25^{\circ}\text{C}$ における動作利得の信号波長帯域内での極小値を $G_{\min}$  (dBと)するとき、以下の関係を満たすよう上記 $\Delta T$  (K)を制御する。

$$(\Delta T \cdot G_{\min}) \times 0.0036 - 1.2$$

$$\leq \Delta G \leq$$

$$(\Delta T \cdot G_{\min}) \times 0.0036 + 1.2$$

また、上記制御部は、より高速な利得平坦制御を可能にすべく、当該光増幅器の実際の運用時における  $\Delta G$  (dB) と  $\Delta T$  (K) の実測データを、予め格納したメモリを備えるのが好ましい。

上記制御部は、利得平坦度のフィードバック制御のため、検出された利得傾斜に基づいて、上記 B i 系光導波路又はその近傍の温度を変化させてもよい。

具体的には、この発明に係る光増幅器は、上述のような構造を備えた光増幅モジュール（この発明に係る光増幅モジュール）と、例えば可変減衰器などの光損失部品と、制御部を備える。上記光損失部品は、信号光の伝送経路上に設けられ、該信号光に対する損失特性が可変である。また、上記制御部は、検出された光増幅モジュールにおける利得傾斜が正のときに該光増幅モジュールの B i 系光導波路に対する加熱指示を行う一方、検出された光増幅モジュールにおける利得傾斜が負のときに該光増幅モジュールの B i 系光導波路に対する冷却指示を行う。

なお、信号チャネル間のレベル偏差に影響されずに利得傾斜を検出するため、当該光増幅器は、信号経路から分岐された信号光の一部を受光することにより、利得傾斜の検出を行うオプティカルパフォーマンスモニタをさらに備えてもよい。また、簡単な利得傾斜の検出方法としては、上記 B i 系光導波路内を伝搬する信号光に含まれるチャネルのうち少なくとも一チャネルの信号レベルをモニタすることにより、利得傾斜を検出することもできる。さらに、信号波長帯域における少なくともいずれかの波長における ASE レベルをモニタすることにより、利得傾斜を検出してもよい。

上記光損失部品として可変光減衰器を有する光増幅モジュールを含む光増幅器において、制御部は、検出された光増幅モジュールの B i 系光導波路又はその近傍の温度変化  $\Delta T$  (K) に基づいて、該光増幅モジュールの可変光減衰器における光減衰量  $\Delta A$  (dB) を決定してもよい。この場合、消費電力を節約しながら

利得平坦度の維持が可能になる。具体的には、上記制御部は、可変減衰器における光減衰量  $\Delta A$  (dB) が検出された温度変化  $\Delta T$  (K) に比例するよう、該可変減衰器を制御する。

利得平坦度を  $\pm 1$  dB の高精度で維持するためには、上記制御部は、光増幅モジュールにおける Bi 系光導波路単体の  $25^{\circ}\text{C}$  における動作利得の信号波長帯域内での極小値を  $G_{\min}$  (dB) とするとき、可変減衰器における光減衰量  $\Delta A$  (dB) が以下の関係を満たすよう、上記温度変化  $\Delta T$  (K) に基づいて、可変減衰器を制御する。

$$-0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T - 1.2$$

$$\leq \Delta A \leq$$

$$-0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T + 1.2$$

さらに、上記制御部は、光増幅モジュールにおける Bi 系光導波路単体の  $25^{\circ}\text{C}$  における動作利得の信号波長帯域内での極小値を  $G_{\min}$  (dB) とするとき、可変減衰器における光減衰量  $\Delta A$  (dB) が以下の関係を満たすよう、該光増幅モジュールにおける動作利得の変化量  $\Delta G$  (dB) 及び温度変化  $\Delta T$  (K) に基づいて、可変減衰器を制御してもよい。

$$-0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T - \Delta G - 1.2$$

$$\leq \Delta A \leq$$

$$-0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T - \Delta G + 1.2$$

なお、上記制御部は、低消費電力で高速制御（演算を行わない）を実現するため、光増幅モジュールにおける動作利得の変化量  $\Delta G$  (dB)、温度変化  $\Delta T$  (K)、さらには可変光減衰器における光減衰量  $\Delta A$  (dB) の、当該光増幅器の実際の運用時における実測データを、予め格納したメモリを備えるのが好ましい。

上述のような構成において、利得平坦度のフィードバック制御を可能にするため、上記制御部は、検出された光増幅モジュールにおける利得傾斜に基づき、上



記可変減衰器の光減衰量  $\Delta A$  (dB) を変化させてもよい。具体的には、上記制御部は、検出された光増幅モジュールにおける利得傾斜が正のときに可変減衰器の光減衰量  $\Delta A$  (dB) の増加指示を行う一方、検出された光増幅モジュールにおける利得傾斜が負のときに可変減衰器の光減衰量  $\Delta A$  (dB) の減少指示を行う。

この場合も、当該光増幅器は、信号チャネル間の偏差に影響されずに利得傾斜を検出するため、信号経路から分岐された信号光の一部を受光することにより、利得傾斜の検出を行うオプティカルパフォーマンスモニタをさらに備えるのが好ましい。また、Bi系光導波路内を伝搬する信号光に含まれるチャネルのうち少なくとも一チャネルの信号レベルをモニタすることにより、あるいは、信号波長帯域における少なくともいずれかの波長におけるASEレベルをモニタすることによっても利得傾斜を検出することができる。

なお、この発明に係る光増幅モジュールは、多重化信号光の伝送経路上に設けられ該多重化信号光に対する損失特性が可変である光損失部品を備えてもよく、具体的に光損失部品は、可変光減衰器を含むのが好ましい。この場合、Bi系光導波路の正味利得において相対利得偏差を25%以下とすることが可能となる。

この発明に係る光増幅モジュールは、Bi系光導波路の背景損失  $\alpha_B$  (dB/m) とErによる吸収ピーク  $\alpha$  (dB/m) との間に以下のような関係が成り立つのが好ましい。

$$\alpha_B \leq 0.021 \alpha$$

さらに、以下のような関係が成り立つのが好ましい。

$$\alpha_B \leq 0.015 \alpha$$

前者の場合には、Bi系光導波路の正味利得において相対利得偏差を25%以下とすることが可能となり、後者の場合には、Bi系光導波路の正味利得において相対利得偏差を19%以下とすることが可能となる。

この発明に係る光増幅モジュールにおいて、Bi系光導波路は光ファイバを含

むのが好ましい。この場合、導波路長を長くすることができ、利得を大きくすることができからである。

また、この発明に係る光増幅モジュールにおいて、励起光供給システムは、中心出力波長が最高出力時に1453nm～1473nmの範囲にある光源を含むのが好ましい。さらに該励起光供給システムは、中心出力波長が常時1453nm～1473nmの範囲にある光源を含むのが好ましい。Bi系光導波路の励起効率が優れているからである。

より具体的には、この発明に係る光増幅モジュールにおいて、励起光供給システムは、半導体発光素子と、回折格子を備える。上記半導体発光素子は、光反射面と該光反射面と対向する光出射面とを有する。また、上記回折格子は、半導体発光素子の光出射面から出射された光のうち特定波長の光の一部を反射し、該反射された光を光出射面から半導体発光素子の内部へ入射させるよう機能する。この回折格子としては、例えば光ファイバ内に形成された光ファイバグレーティングが適している。励起光供給システムから供給される励起光の波長を安定させることができるからである。

この発明に係る光増幅モジュールは、石英系ホストガラスからなる石英系光導波路をさらに備えるのが好ましい。なお、この石英系光導波路は、Er元素が添加された光導波領域を有する。この場合、励起効率又は雑音指数が改善される。石英系光導波路が、多重化信号光の進行方向から見てBi系光導波路の上流側に配置された場合、雑音指数が改善される。一方、石英系光導波路が、多重化信号光の進行方向から見てBi系光導波路の下流側に配置された場合には、励起効率が改善される。また、石英系光導波路は、Al元素及びLa元素の少なくとも一方とP元素とが共添加されるのが好ましく、この場合、Lバンド利得帯域が拡張される。

この発明に係る光増幅器及び光通信システムは、多重化信号光の伝送経路上であって該信号光の進行方向から見てBi系光導波路の上流側に配置されたラマン

増幅用光ファイバをさらに備えてもよい。このとき、ラマン増幅用光ファイバには、波長1470nm付近の励起光及び波長1520nm以上の励起光の少なくとも一方が供給されることにより、分布型ラマン増幅器が実現される。

#### 図面の簡単な説明

5 図1は、EDFの相対利得偏差を説明するために用意された典型的な利得スペクトルである。

図2は、A1共添加石英系EDFの利得スペクトルである。

図3は、この発明に係る光通信システムにおける第1実施例の構成を示す図である。

10 図4は、この発明に係る光増幅器における第1実施例の構成を示す図である。

図5は、この発明に係る光増幅器における第2実施例の構成を示す図である。

図6は、Bi系EDFの利得スペクトルである。

図7A及び図7Bは、Bi系EDFの利得スペクトルである。

15 図8は、Bi系EDFの正味利得の相対利得偏差と背景損失との関係を説明するために用意された典型的な利得スペクトルである。

図9は、励起光波長と利得との関係を示すグラフである。

図10は、信号光波長と雑音指数との関係を示すグラフである。

図11は、この発明に係る光増幅器における第3実施例の構成を示す図である。

20 図12は、この発明に係る光増幅器における第4実施例の構成を示す図である。

図13は、この発明に係る光増幅器における第5実施例の構成を示す図である。

図14は、信号光波長と規格化されたGDTとの関係を示すグラフである。

25 図15は、この発明に係る光増幅器における第6実施例の構成を示す図である。

図 1 6 は、利得傾斜制御を説明するための信号出力スペクトルである。

図 1 7 は、この発明に係る光増幅器における第 7 実施例の構成を示す図である。

図 1 8 は、この発明に係る光増幅器における第 8 実施例の構成を示す図である。

図 1 9 A 及び図 1 9 B は、この発明に係る光通信システムにおける第 2 実施例及び比較例の構成をそれぞれ示す図である。

図 2 0 A 及び図 2 0 B は、図 1 9 に示された光通信システムについて、信号光波長と利得の関係及び信号光波長と雑音指数の関係をそれぞれ示すグラフである。

#### 好適な実施例の詳細説明

以下、この発明に係る光増幅モジュール等の各実施例を、図 3～図 6、図 7 A、図 7 B、図 8～図 1 8 及び図 1 9 A～図 2 0 B を用いて詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

図 3 は、この発明に係る光通信システムの第 1 実施例の構成を示す図である。この図に示された光通信システム 1 は、光送信局 1 0、光中継局 2 0、光受信局 3 0 及び光ファイバ伝送路 4 0、5 0 を備えている。光ファイバ伝送路 4 0 は、光送信局 1 0 と光中継局 2 0 との間に敷設されており、光ファイバ伝送路 5 0 は、光中継局 2 0 と光受信局 3 0 との間に敷設されている。

光送信局 1 0 は、光源部  $11_{c1} \sim 11_{c4}$ 、光源部  $11_{L1} \sim 11_{L4}$ 、光合波器  $12_c$ 、光合波器  $12_L$ 、光増幅器  $13_c$ 、光増幅器  $13_L$  及び光合波器 1 4 を備える。光源部  $11_{c1} \sim 11_{c4}$  それぞれは、C バンドに含まれる互いに異なる波長の複数チャネルが多重化された信号光を出力する。光合波器  $12_c$  は、光源部  $11_{c1} \sim 11_{c4}$  それぞれから出力された C バンドの各信号チャネルの光を入力し、これらを合波する。光増幅器  $13_c$  は、光合波器  $12_c$  で合波された C バンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光を一括増幅する。光源部  $11_{L1}$

～1 1<sub>L4</sub>それぞれは、Lバンドに含まれる互いに異なる複数チャネルが多重化された信号光を出力する。光合波器1 2<sub>L</sub>は、光源部1 1<sub>L1</sub>～1 1<sub>L4</sub>それぞれから出力されたLバンドの各信号チャネルの光を入力し、これらを合波する。光増幅器1 3<sub>L</sub>は、光合波器1 2<sub>L</sub>で合波されたLバンドの多重化信号光を入力し、  
5 この多重化信号光を一括増幅する。そして、光合波器1 4は、光増幅器1 3<sub>C</sub>から出力されたCバンドの多重化信号光と、光増幅器1 3<sub>L</sub>から出力されたCバンドの多重化信号光とを入力し、これらを合波する。光合波器1 4で合波された多重化信号光は、光ファイバ伝送路4 0へ送出される。

光中継局2 0は、光分波器2 1、光合波器2 3、光増幅器2 3<sub>C</sub>及び光増幅器  
10 2 3<sub>L</sub>を備える。光分波器2 1は、光ファイバ伝送路4 0を介して到達した多重化信号光を入力し、その多重化信号光をCバンドとLバンドとに分波する。Cバンドに分波された多重化信号光は光増幅器2 3<sub>C</sub>へ導かれる一方、Lバンドに分波された多重化信号光は光増幅器2 3<sub>L</sub>へ出力される。光増幅器2 3<sub>C</sub>は、光分波器2 1から出力されたCバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光を  
15 一括増幅する。光増幅器2 3<sub>L</sub>は、光分波器2 1から出力されたLバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光を一括増幅する。そして、光合波器2 2は、光増幅器2 3<sub>C</sub>から出力されたCバンドの多重化信号光と、光増幅器2 3<sub>L</sub>から出力されたCバンドの多重化信号光とを入力し、これらを合波する。そして、このように合波された多重化信号非有りが光ファイバ伝送路5 0へ送出される。

光受信局3 0は、受光部3 1<sub>C1</sub>～3 1<sub>C4</sub>、受光部3 1<sub>L1</sub>～3 1<sub>L4</sub>、光分波器  
20 3 2<sub>C</sub>、光分波器3 2<sub>L</sub>、光増幅器3 3<sub>C</sub>、光増幅器3 3<sub>L</sub>及び光分波器3 4を備える。光分波器3 4は、光ファイバ伝送路5 0を介して到達した多重化信号光を入力し、その多重化信号光をCバンドとLバンドとに分波する一方、Cバンドの多重化信号光を光増幅器3 3<sub>C</sub>へ出力し、Lバンドの多重化信号光を光増幅器3  
25 3<sub>L</sub>へ出力する。光増幅器3 3<sub>C</sub>は、光分波器3 4から出力されたCバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光を一括増幅して出力する。光分波器3 2

cは、光増幅器33<sub>c</sub>から出力されたCバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光をチャンネルごとに分波する。受光部31<sub>c1</sub>～31<sub>c4</sub>それぞれは、光分波器32<sub>c</sub>により分波されて出力されたCバンドの各波長の信号光を受光して、これを電気信号に変換して出力する。光増幅器33<sub>L</sub>は、光分波器34より出力されたLバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光を一括増幅して出力する。光分波器32<sub>L</sub>は、光増幅器33<sub>L</sub>から出力されたLバンドの多重化信号

光を入力し、この多重化信号光をチャンネルごとに分波する。受光部31<sub>L1</sub>～31<sub>L4</sub>それぞれは、光分波器32<sub>L</sub>により分波されたLバンドに含まれる複数チャンネルの信号光を受光して、これを電気信号に変換する。

この光通信システム1において、光源部11<sub>c1</sub>～11<sub>c4</sub>から出力されたCバンドの多重化信号光は、光送信局10内の光合波器12<sub>c</sub>により合波され、光増幅器13<sub>c</sub>により一括増幅された後、光合波器14を経て、光ファイバ伝送路40へ送出される。光ファイバ伝送路40を伝搬したCバンドの多重化信号光は、光中継局20内の光分波器21を通過して光増幅器23<sub>c</sub>により一括増幅された後、光合波器22を経て、光ファイバ伝送路50へ送出される。光ファイバ伝送路50を伝搬してきたCバンドの多重化信号光は、光受信局30内の光分波器34を経て、光増幅器33<sub>c</sub>により一括増幅された後、光分波器32<sub>c</sub>により信号チャンネルごとに分波され、受光部31<sub>c1</sub>～31<sub>c4</sub>に受信される。

一方、光源部11<sub>L1</sub>～11<sub>L4</sub>から出力されたLバンドの多重化信号光は、光送信局10内の光合波器12<sub>L</sub>により合波され、光増幅器13<sub>L</sub>により一括増幅された後、光合波器14を経て、光ファイバ伝送路40へ送出される。光ファイバ伝送路40を伝搬してきたLバンドの多重化信号光は、光中継局20内の光分波器21を経て、光増幅器23<sub>L</sub>により一括増幅された後、光合波器22を経て、光ファイバ伝送路50へ送出される。光ファイバ伝送路50を伝搬してきたLバンドの多重化信号光は、光受信器30内の光分波器34を経て、光増幅器33<sub>L</sub>により一括増幅された後、光分波器32<sub>L</sub>により信号チャンネルごとに分波され

、受光部 31<sub>L1</sub>～31<sub>L4</sub>により受信される。

図4は、この発明に係る光増幅器における第1実施例の構成を示す図である。

この図に示された光増幅器100は、図3に示された光通信システム1に含まれる光増幅器13<sub>L</sub>に適している。この光増幅器100は、入力端101から出力

5 端102へ向かって順に、光カップラ111、光アイソレータ121、光カップラ113、Bi系EDF130、光カップラ114、光アイソレータ123及び光カップラ112を備える。また、この光増幅器100は、光カップラ111に接続された受光素子151、光カップラ112に接続された受光素子152、光カップラ113に接続された励起光源153、光カップラ114に接続された励起光源154、Bi  
10 i系EDF130に接して又は近傍に設けられた温度検出素子161及び温度調整素子162、ならびに、当該光増幅器100全体の動作を制御する制御部190を備える。

光カップラ111は、入力端101を介して入力された多重化信号光の一部を分岐して受光素子151へ出力する一方、残りを光アイソレータ121へ出力する。  
15 光カップラ112は、光アイソレータ122から到達した多重化信号光の一部を分岐して受光素子152へ出力する。受光素子151、152それぞれは、到達した多重化信号光を受光して、その光パワーに応じた値の電気信号を制御部190へ出力する。

光カップラ113は、光アイソレータ121から到達した多重化信号光をBi系EDF130へ出力するとともに、励起光源153から出力された励起光をもBi  
20 i系EDF130へ出力する。光カップラ114は、Bi系EDF130から到達した多重化信号光を光アイソレータ122へ出力するとともに、励起光源154から出力された励起光をBi系EDF130へ出力する。これら光カップラ113、114及び励起光源153、154は、Bi系EDF130へ励起光を供給する  
25 励起光供給システムを構成する。

励起光源153、154それぞれは、Bi系EDF130に添加されたEr元

素を励起するための励起光を出力する光学デバイスであり、例えば、半導体レーザー光源が適している。また、励起光源 1 5 3、1 5 4それぞれは、中心出力波長が最高出力時に 1 4 5 3 nm～1 4 7 3 nmの範囲にあるのが好ましく、また、中心出力波長が常時 1 4 5 3 nm～1 4 7 3 nmの範囲にあるのがさらに好ましい。このような波長の励起光が利用されることにより、B i 系 E D F 1 3 0 における信号増幅効率が向上する。

また、励起光源 1 5 3、1 5 4それぞれは、光反射面と該光反射面に対向する光出射面とを有するレーザーダイオードと、このレーザーダイオードの光出射面から出射された光のうち特定波長の光の一部を反射して光出射面からレーザーダイオードの内部へ入射させる回折格子とを含む。なお、この回折格子は光ファイバ上に形成された光ファイバグレーティングが適している。このように構成された励起光源 1 5 3、1 5 4それぞれにより、出力波長が安定する。

光アイソレータ 1 2 1、1 2 2それぞれは、入力端 1 0 1 から出力端 1 0 2 へ向かう順方向に光を通過させるが、逆方向には光を通過させない光学デバイスである。

B i 系 E D F 1 3 0 は、酸化 B i 系ホストガラスからなり、その光導波領域に E r 元素が添加されている光ファイバである。なお、この B i 系 E D F 1 3 0 は光ファイバではなく平面型光導波路であってもよいが、Lバンド用途では大きな吸収条長積 (Unsaturated Absorption) が必要であるので、導波路長を確保し易い光ファイバが好ましい。この B i 系 E D F 1 3 0 の光導波領域内では、励起光源 1 5 3、1 5 4 から出力された励起光が供給されることにより反転分布が生じ、波長 1 6 1 0 nm以上の波長域を含む信号波長帯域の複数チャネルが多重化された信号光が一括増幅される。

温度検出素子 1 6 1 は、B i 系 E D F 1 3 0 に接して又は近傍に配置されており、B i 系 E D F 1 3 0 又はその近傍の温度を検出する、例えばサーミスタなどが適している。温度調整素子 1 6 2 は、B i 系 E D F 1 3 0 に接して又は近傍に



配置されており、B i 系 E D F 1 3 0 又はその近傍の温度を調整する、例えばペルチェ素子やヒータが適している。

制御部 1 9 0 は、光増幅器 1 0 0 全体の動作を制御する。制御部 1 9 0 は、受光素子 1 5 1、1 5 2 それぞれから出力された電気信号を入力し、B i 系 E D F 1 3 0 へ入力される信号光の光パワーを検知するとともに、B i 系 E D F 1 3 0 から出力された信号光の光パワーを検知する。また、制御部 1 9 0 は、これら入

力信号光パワー及び出力信号光パワーに基づいて、B i 系 E D F 1 3 0 における増幅利得を求める。制御部 1 9 0 は、温度検出素子 1 6 1 により検出された B i 系 E D F 1 3 0 又はその近傍の温度を得る。そして、制御部 1 9 0 は、これら検出情報に基づいて、励起光源 1 5 3、1 5 4 それぞれから出力される励起光の光パワーを制御し、温度調整素子 1 6 2 による B i 系 E D F 1 3 0 又はその近傍の温度調整を制御する。

この光増幅器 1 0 0 の概略動作は以下のとおりである。励起光源 1 5 3、1 5 4 から出力された励起光源は、光カップラ 1 1 3、1 1 4 を経て、B i 系 E D F 1 3 0 へ供給される。入力端 1 0 1 を介して入力された L バンドの多重化信号光は、光カップラ 1 1 1、光アイソレータ 1 2 1 及び光カップラ 1 1 3 を経て B i 系 E D F 1 3 0 に到達し、この B i 系 E D F 1 3 0 において一括光増幅される。B i 系 E D F 1 3 0 において増幅された多重化信号光は、光カップラ 1 1 4、光アイソレータ 1 2 3 及び光カップラ 1 1 2 を経て出力端 1 0 2 から出力される。

この光増幅器 1 0 0 に含まれる B i 系 E D F 1 3 0 における信号増幅動作は以下のように行われる。すなわち、当該光増幅器 1 0 0 の動作温度のうち何れかの動作温度において、B i 系 E D F 1 3 0 における正味利得スペクトルの相対利得偏差が 2 5 % 未満、好ましくは 1 9 % 未満となるよう、励起光供給システムから B i 系 E D F 1 3 0 に供給される励起光の光パワーが調整される。

当該光増幅器 1 0 0 の全動作温度範囲内において、B i 系 E D F 1 3 0 における正味利得スペクトルの相対利得偏差が 2 5 % 未満、さらには 1 9 % 未満となる

よう、励起光供給システムからBi系EDF130に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

当該光増幅器100の全動作温度範囲内において、Bi系EDF130における正味利得スペクトルの相対利得偏差が25%未満となる波長帯域幅が37nm  
5 を超えるか、さらには50nmを超えるよう、励起光供給システムからBi系EDF130に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

さらに、当該光増幅器100の全動作温度範囲内において、Bi系EDF130における正味利得スペクトルの相対利得偏差が19%未満となる波長帯域幅が37nm  
10 を超えるか、さらには50nmを越えるよう、励起光供給システムからBi系EDF130に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

図5は、この発明に係る光増幅器における第2実施例の構成を示す図である。この図に示された光増幅器200は、図3に示された光通信システム1に含まれる光増幅器23<sub>L</sub>、33<sub>L</sub>に適している。この光増幅器200は、入力端201から出力端202へ向かって順に、光カップラ211、光アイソレータ221、光  
15 カップラ213、Bi系EDF231、光アイソレータ222、分散補償光ファイバ270、光アイソレータ223、光カップラ214、Bi系EDF232、石英系EDF233、光カップラ215、光アイソレータ224及び光カップラ212を備える。また、この光増幅器200は、光カップラ211に接続された受光素子251、光カップラ212に接続された受光素子252、光カップラ213に接続され  
20 た励起光源253、光カップラ214に接続された励起光源254、光カップラ215に接続された励起光源255、Bi系EDF231に接して又は近傍に配置された温度検出素子261及び温度調整素子264、Bi系EDF232に接して又は近傍に配置された温度検出素子262及び温度調整素子265、石英系EDF233に接して又は近傍に配置された温度検出素子263及び温度調整素子2  
25 66、ならびに当該光増幅器200全体の動作を制御する制御部290を備える。

光カップラ211は、入力端201を介して入力された多重化信号光の一部を分

岐して受光素子251へ出力する一方、残りを光アイソレータ221へ出力する。光カプラ212は、光アイソレータ224から到達した多重化信号光の一部を分岐して受光素子252へ出力する。受光素子251、252それぞれは、到達した多重化信号光を受光して、その光パワーに応じた値の電気信号を制御部290へ出力する。

光カプラ213は、光アイソレータ221から到達した多重化信号光をBi系

EDF231へ出力するとともに、励起光源253から出力された励起光をもBi系EDF231へ出力する。光カプラ214は、光アイソレータ223から到達した多重化信号光をBi系EDF232へ出力するとともに、励起光源254から出力された励起光をもBi系EDF232へ出力する。光カプラ215は、石英系EDF233から到達した多重化信号光を光アイソレータ224へ出力するとともに、励起光源255から出力された励起光を石英系EDF233へ出力する。光カプラ213及び励起光源253は、Bi系EDF231へ励起光を供給する励起光供給システムの一部を構成する。また、光カプラ214、215及び励起光源254、255も、Bi系EDF232及び石英系EDF233へ励起光を供給する励起光供給システムの一部を構成する。

励起光源253～255それぞれは、Bi系EDF231、232又は石英系EDF233に添加されたEr元素を励起するための励起光を出力する光学デバイスであり、例えば、半導体レーザ光源などが適している。また、励起光源253、254それぞれは、中心出力波長が最高出力時に1453nm～1473nmの範囲にあるのが好ましく、また、中心出力波長が常時1453nm～1473nmの範囲にあるのがさらに好ましい。このような波長の励起光が利用されることにより、Bi系EDF231、232における増幅効率が向上する。

また、励起光源253～255それぞれは、光反射面と該光反射面と対向する光出射面とを有するレーザダイオードと、このレーザダイオードの光出射面から出射された光のうち特定波長の光の一部を反射して光出射面からレーザダイオー

ドの内部へ入射させる回折格子とを含む。この回折格子には、光ファイバ上に形成された光ファイバグレーティングが適している。このように構成される励起光源 253～255それぞれにより、出力波長は安定する。

5 光アイソレータ 221～224それぞれは、入力端 201 から出力端 202 へ向かう順方向に光を通過させるが、逆方向には光を通過させない。

Bi系EDF 231、232それぞれは、酸化Bi系ホストガラスからなり、その光導波領域にEr元素が添加されている光ファイバである。このBi系EDF 231、232の光導波領域内では、励起光源 253、254から出力された励起光が供給されることにより反転分布が生じ、波長 1610 nm以上の波長域を含む信号波長帯域の複数チャネルが多重化された信号光を一括増幅される。

10

石英系EDF 233は、石英系ホストガラスからなり、その光導波領域にEr元素が添加されている光ファイバである。この石英系EDF 233の光導波領域内では、励起光源 255から出力された励起光が供給されることにより反転分布が生じ、多重化信号光が一括増幅される。石英系EDF 233は、図5に示されたように、多重化信号光の進行方向から見てBi系EDF 233の下流側に配置されるのが好ましく、この場合、優れた励起効率が得られる。また、石英系EDF 233は、Bi系EDF 232の上流側に配置されるのも好ましく、この場合には優れた雑音指数が得られる。また、石英系EDF 233は、Al元素及びLa元素の少なくともいずれか一方とP元素とが共添加されているのがよい。

15

20 温度検出素子 261は、Bi系EDF 231に接して又は近傍に配置されており、Bi系EDF 231又はその近傍の温度を検出する。温度検出素子 262は、Bi系EDF 232に接して又は近傍に配置されており、Bi系EDF 232又はその近傍の温度を検出する。温度検出素子 263は、石英系EDF 233に接して又は近傍に配置されており、石英系EDF 233又はその近傍の温度を検出する。温度検出素子 261～263それぞれは、例えばサーミスタなどが適している。

25

温度調整素子264は、Bi系EDF231に接して又は近傍に配置されており、Bi系EDF231又はその近傍の温度を調整する。温度調整素子265は、Bi系EDF232に接して又は近傍に配置されており、Bi系EDF232又はその近傍の温度を調整する。温度調整素子266は、石英系EDF233に接して又は近傍に配置されており、石英系EDF233又はその近傍の温度を調整する。温度調整素子264～266それぞれは、例えばペルチエ素子やヒータが適している。

分散補償光ファイバ270は、信号光波長帯域において負の波長分散を有し、光ファイバ伝送路40又は光ファイバ伝送路50における正の波長分散を補償する。

制御部290は、光増幅器200全体の動作を制御する。制御部290は、受光素子251、252それぞれから出力された電気信号を入力し、Bi系EDF231へ入力された信号光の光パワーを検知するとともに、石英系EDF233から出力された信号光の光パワーを検知し、また、これら入力信号光パワー及び出力信号光パワーに基づいてBi系EDF231、232及び石英系EDF233における信号光増幅の利得を求める。また、制御部290は、温度検出素子261により検出されたBi系EDF231又はその近傍の温度、温度検出素子262により検出されたBi系EDF232又はその近傍の温度、及び、温度検出素子263により検出された石英系EDF233又はその近傍の温度を得る。そして、制御部290は、これら検出された情報に基づいて、励起光源253、254それぞれから出力される励起光の光パワーを制御し、温度調整素子264によるBi系EDF231又はその近傍の温度調整を制御し、温度調整素子265によるBi系EDF232又はその近傍の温度調整を制御し、温度調整素子266による石英系EDF233又はその近傍の温度調整を制御する。

この光増幅器200の概略動作は以下のとおりである。励起光源253～255から出力された励起光源は、光カプラ213～215を経て、Bi系EDF2

31、232及び石英系EDF233へ供給される。入力端201を介して入力されたLバンドの多重化信号光は、光カップラ211、光アイソレータ221及び光カップラ213を経て、Bi系EDF231に入力され、このBi系EDF231において一括増幅される。Bi系EDF231において増幅された多重化信号光は、光アイソレータ222を経て、分散補償光ファイバ270に入力され、この分散補償光ファイバ270により分散補償される。分散補償光ファイバ270

により分散補償された多重化信号光は、光アイソレータ223及び光カップラ214を経て、Bi系EDF232及び石英系EDF233に順次に入力され、これらBi系EDF232及び石英系EDF233において一括増幅される。この光増幅された多重化信号光は、光カップラ215、光アイソレータ224及び光カップラ212を経て出力端202から出力される。

この光増幅器200に含まれるBi系EDF231、232における信号増幅動作は以下のように行われる。すなわち、当該光増幅器200の何れかの動作温度において、Bi系EDF231、232における正味利得スペクトルの相対利得偏差が25%未満、さらには19%未満となるよう、励起光供給システムからBi系EDF231、232に供給される励起光の光パワーが調整される。

また、当該光増幅器200の全動作温度範囲内において、Bi系EDF231、232における正味利得スペクトルの相対利得偏差が25%未満、さらには19%未満となるよう、励起光供給システムからBi系EDF231、232に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

当該光増幅器200の全動作温度範囲内において、Bi系EDF231、232における正味利得スペクトルの相対利得偏差が25%未満となる波長帯域幅が37nmを超えるか、さらには50nmを越えるよう、励起光供給システムからBi系EDF231、232に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

さらに、当該光増幅器200の全動作温度範囲内において、Bi系EDF231、232における正味利得スペクトルの相対利得偏差が19%未満となる波長

帯域幅が37nmを超えるか、さらには50nmを越えるよう、励起光供給システムからBi系EDF231、232に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

次に、光増幅器100、200に含まれるBi系EDF130、231、232についてさらに詳細に説明する。

図6は、Bi系EDFの利得スペクトルである。用意されたBi系EDFは、Er元素に起因した吸収条長積ピークが約300dBであり、長さが約2mであり、石英系光ファイバとの融着接続損失を含む背景損失が1.6dB程度であった。また、評価方法としては、増幅されるべき多重化信号光の代わりに、少数チャネルの主信号で模擬するポンプ・プローブ法が適用された。トータル入力信号光の光パワーは0dBmであり、1.48μm波長帯の励起光がBi系EDFへ双方向より供給された。

この図6には、Bi系EDFへ供給される励起光の光パワーを調整して得られた室温における4種類の反転分布1～4それぞれの場合について利得スペクトルが示されている。なお、グラフG410は反転分布1の利得スペクトル、グラフG420は反転分布2の利得スペクトル、グラフG430は反転分布3の利得スペクトル、そしてグラフG440は反転分布4の利得スペクトルである。この図6に示された4つの反転分布1～4のうち、反転分布3は、順方向励起光パワーが105mWであり、逆方向励起光パワーが32mWであるときに得られた。この反転分布3でLバンドにおいて最も良好な利得平坦度が得られた。

この反転分布3のときに、Bi系EDFの両端に接続された石英系光ファイバ間の正味利得において、相対利得偏差は14%であり、実効的信号波長域が1563nm～1615nmであり、実効的信号波長域の帯域幅が52nmであり、実効的信号波長域の利得極小値が11.8dBであった。このBi系EDFの相対利得偏差は、高濃度のAl元素が添加されたCバンド用石英系EDFの相対利得偏差と同程度であった。このBi系EDFの実効的信号波長域の帯域幅は、高

濃度のA1元素が添加されたCバンド用石英系EDFの帯域幅(37nm)を大きく上回るものであった。また、このBi系EDFは、石英系光ファイバとの融着接続損失を含む背景損失が1.6dB程度であるので、Bi系EDF単体であれば相対利得偏差は更に1.6%程度改善される。

5 図7A及び7Bも、Bi系EDFの利得スペクトルである。ここでは、陸上幹線系の光通信システムで一般に要求される動作温度範囲内の0℃、25℃及び6

5それぞれにおいて2つの利得極大値が一致するように反転分布が調整された。図7Bは、図7Aの縦軸を拡大したものであり、各温度において利得極小値を基準として利得偏差が縦軸に示されている。なお、これら図7A及び図7Bにおいて、グラフG510a、G510bは温度0℃における利得スペクトル、グラフG520a、G520bは温度25℃における利得スペクトル、グラフG530a、グラフG530bは温度65℃における利得スペクトルである。

この図7A及び図7Bに示されたように、温度が高いほど利得は小さい。それゆえ、所望の利得平坦度を得るのに必要なBi系EDFの吸収条長積ピークを求める際に、使用時の温度を規定することが重要である。また、図7Bに示されたように、各温度の利得スペクトルの形状は実効的信号波長域1563nm~1615nmにおいて略一定であり、また、各温度で実効的信号波長域も略一定である。温度が高いほど利得極小値が小さく、その一方で、各温度で利得偏差が略一定であるので、温度が高いほど相対利得偏差は劣化する。しかしながら、温度65℃においても相対利得偏差は15%（背景損失を除くと14%）であり、これは、A1元素が添加されたCバンド用石英系EDFの相対利得偏差より良好である。

図7Aから読み取れるように、室温時において吸収条長積ピークが275dBであるBi系EDFが適用された光増幅器は、実効的信号波長域内の利得極小値 $G_{min}$ (dB)と温度T(℃)との間に以下の関係(1)がある。

$$G_{min} = -0.049T + 14.6 \quad \dots (1)$$



また、均一広がり近似から、吸収条長積と利得極小値 $G_{min}$ とは互いに比例関係にあるので、ある動作温度 $T$  (°C) においてBi系EDFを用いて所望の利得 $G_x$  (dB) を得たい場合には、以下の式(2)で与えられる吸収条長積ピーク $\alpha_T$  (dB) を有するBi系EDFを用いれば、上記の実効的信号波長域1563nm $\sim$ 1615nmにおいて平坦化された利得スペクトルが得られる。

$$\alpha_T = 6122 G_x / (298 - T) \quad \dots (2)$$

なお、厳密には、上述の利得 $G_x$ にはBi系EDF自体の背景損失と融着接続損失とを加えるべきである。例えば、動作温度25°Cにおいて、Bi系EDFの両端に接続された石英系光ファイバ間で25dBの正味利得をLバンドで得るには、背景損失と融着接続損失との合計値が1dBであるとする、以下の式(3)のようにする必要がある。

$$G_x = 25 + 1 \quad \dots (3)$$

この利得 $G_x$ の値と動作温度 $T$ の値25°Cとを上記(2)式に代入すると、必要な吸収条長積ピーク $\alpha_T$ は580dB程度であることが分かる。

特にLバンドでの信号増幅において、一連長(unitary)のBi系EDFが長すぎると励起光がBi系EDF全体に行き渡らない事態も生じ得るので、Bi系EDFを多段構成とすることで、各段のBi系EDFに励起光を供給するのが好ましい。

また、上述のように、所望の利得平坦度を得るのに必要なBi系EDFの吸収条長積ピークを求める際に、使用時の温度を規定することが重要である。すなわち、動作温度を規定せずにBi系EDFの利得平坦度を検討することは無意味である。そこで、図4及び図5に示された光増幅器100、200では、温度検出素子により各Bi系EDF又はその近傍の温度を検出し、温度調整素子により各Bi系EDF又はその近傍の温度を目標設定温度に調整している。この場合、温度調整素子(例えばペルチエ素子やヒータ)の消費電力を抑制するために、目標設定温度は、光増幅器が運用される典型的な動作温度範囲(陸上光通信システム

の場合には室温～40℃、海底光通信システムの場合には0℃～10℃程度) とするのが好ましい。

ただし、温度調整素子は一般に消費電力が大きく、また、周囲の環境に温度調整は大きく影響されるので、様々な使用環境を考慮すると高精度の温度制御は容易ではない。Bi系EDFの動作温度範囲が比較的広いと、利得平坦度の劣化につながる。そこで、以下に説明するような対処を行うのがよい。

図7Bから読み取れるように、実効的信号波長域内の利得極小値 $G_{min}$  (dB) の変化量  $\Delta G_{min}$  (dB) と温度変化  $\Delta T$  (℃) との間に、以下の関係(4)がある。

$$0.0036 \Delta T \cong \Delta G_{min} / G_{min}^* \quad \dots (4)$$

ここで、 $G_{min}^*$ は、温度25℃における利得極小値 $G_{min}$ である。上記の係数0.0036は、石英系EDFの場合の係数0.0026より大きい。この関係式を用いて以下のような対処法を採用する。

第1の対処法は、温度検出素子により各Bi系EDFの温度 $T$ を検出し、温度変化  $\Delta T$ に基づいて光減衰量又は損失スペクトルを調整することで、温度変化  $\Delta T$ により生じた利得偏差を補償する。可変光減衰器が適用された場合、上記(3)式の関係を利用して、その可変光減衰器における光減衰量の変化量  $\Delta A$ と、Bi系EDFの温度変化量  $\Delta T$ との間に、実効的に以下のような関係(5)が成り立つとして、可変光減衰器における光減衰量の変化量  $\Delta A$ を求める。

$$\Delta A = -C_1 \Delta T \quad \dots (5)$$

ここで、 $C_1$ は正の定数である。そして、可変光減衰器における光減衰量は、この変化量  $\Delta A$ だけ調整される。なお、このような計算式を用いるのではなく、光増幅器の運用開始前に、可変光減衰器における光減衰量とBi系EDFの温度 $T$ との間の関係を実測し、その関係を制御部190、290内のメモリに記憶しておいて、これに基づいて制御を行ってもよい。

第2の対処法は、フィードバック制御又はフィードフォワード制御により温度

調整素子により各B i系EDFの温度を能動的に制御する。利得変化量  $\Delta G$  とB i系EDFの温度変化量  $\Delta T$  との間の関係は、上記(3)式の関係を利用して、以下の式(6)で与えられる。

$$\Delta G = -C_2 \Delta T \quad \dots (6)$$

5        ここで、 $C_2$ は正の定数である。そして、各B i系EDFの温度は、この変化量  $\Delta T$  だけ温度調整素子により調整される。なお、このような計算式を用いる

のではなく、光増幅器の運用開始前に、利得GとB i系EDFの温度Tとの間の関係を実測し、その関係を制御部190、290内のメモリに記憶しておいて、これに基づいて制御を行ってもよい。

10        利得変化  $\Delta G$  は、光増幅器100の受光素子151、152又は光増幅器200の受光素子251、252による入力信号光パワー及び出力信号光パワーの検出に基づいて得られる。あるいは、利得変化  $\Delta G$  は、光通信システムの上位監視網から送られて来た所望の利得（多くの場合、敷設された光ファイバ伝送路の損失と一致）の情報に基づいて決定されてもよい。

15        なお、上記第1の対処法及び第2の対処法は、温度調整素子による各B i系EDFの温度を一定値に制御する方法と併用されてもよい。例えば、常時は温度調整素子による各B i系EDFの温度を一定値に制御する方法が採用され、温度制御素子が故障したときに第1の対処法が採用されるのが適している。このような対処方法により、光通信システム1の信頼性はさらに向上する。

20        また、これらの対処法を採用して利得極小値の変動を補償したとしても、図7Bから判るように、利得スペクトルの形状は温度によって僅かに異なっている。実効的信号波長域における利得偏差は、温度65℃のときと比べて、温度0℃のときには0.2dB～0.3dB程度大きい。図7A及び図7Bでは実効的信号波長域における利得極小値が10dB程度であるが、仮に実効的信号波長域における利得極小値が20dBであると、実効的信号波長域における利得偏差は、温度65℃のときと温度0℃のときとでは0.4dB～0.6dBもの差が生じて、

25

実用上無視し得ない。

このような事態に対処するには、光損失部品の損失スペクトルを、動作温度範囲の中心温度又は典型温度におけるBi系EDFの利得スペクトルと同一形状にするのが好ましい。この場合、温度変化により利得偏差が生じるが、これによる

5 利得偏差は小さく抑えられる。

あるいは、温度変化により生じる利得偏差は実効的信号波長域において略定数倍に変化するので、このように調整が可能な損失スペクトルを有する光損失部品の利用が好ましい。このような光損失部品は、例えば、マッハツェンダ干渉計の構成を有して、一方の光路上に動作温度範囲の下限值での利得スペクトルと

10 同一形状の損失スペクトルを有する利得等化器が設けられ、他方の光路は単なるバイパスとなっていてよい。

また、図5に示された光増幅器200の如くBi系EDF231、232に加えて石英系EDF233においても信号光を増幅する場合、上記の第1の対処法を採用する際には、Bi系EDFと石英系EDFとでは、温度依存性が相違して

15 いるので、別個に温度検出素子を設けるのが好ましい。また、上記の第2の対象法を採用する際には、石英系EDFよりBi系EDFの方が僅かな温度変化でも利得を効率よく調整することができるので、石英系EDFよりBi系EDFの方が長いのが好ましい。

上記(3)式で説明したとおり、Bi系EDFにおけるEr遷移に起因して利得スペクトルが平坦であっても、背景損失が大きければ、Bi系EDFの正味利得の相対利得偏差は劣化する。図8は、Bi系EDFの正味利得の相対利得偏差と背景損失との関係を説明する図である。この図に示されるように、Bi系EDFの正味利得スペクトルG620は、Er遷移に起因した利得スペクトルG610から、背景損失及び融着損失の損失分 $\Delta E$ を減じたものである。利得最大値と利得極小値との差 $\Delta G$ が変化しないものの、Bi系EDFの正味利得スペクトルの利得極小値 $G_b$ は、Er遷移に起因して利得スペクトルの利得極小値 $G_0$ より小

20

25

さい。このことから、背景損失が大きいほど、B i 系 E D F の正味利得の相対利得偏差は劣化する。図 6、図 7 A 及び図 7 B に利得スペクトルが示された B i 系 E D F は、特に背景損失が小さいことから、正味利得としても相対利得偏差は小さい。しかしながら、典型的には B i 系 E D F の背景損失は 2 d B / m 程度である。

以下では説明の簡便化のために室温化での動作について説明する。B i 系 E D F の背景損失  $\alpha_B$  (d B / m) の許容値と、E r 本来の吸収ピーク  $\alpha$  (d B / m) との間には、以下の関係(7)が成り立つ。

$$(0.12 \times 0.042 \times \alpha) / (0.042 \times \alpha - \alpha_B)$$

$$\leq \text{正味利得の相対利得偏差} \quad \dots (7)$$

ここで、定数値 0.12 は、図 6 に示された反転分布 3 の際の利得スペクトルから実測された背景損失が無いとした場合の相対利得偏差である。また、定数値 0.042 は、上記(2)式に温度 T として陸上システムでの典型的動作温度 40℃を代入して得られる利得  $G_x$  と吸収ピークとの比率である。相対利得偏差の目標値については、既述したとおり、19%を超えると、Cバンド用石英系 E D F と同等のレベルダイアグラム設計ができなくなり、25%を超えると、P / A 1 共添加石英系 E D F に対する優位性を失う。それ故、相対利得偏差の目標値は、25%以上であるのが好ましく、19%以上であるのがさらによい。

そこで、上記(7)式における右辺の正味利得の相対利得偏差を 25%又は 19%とすると、上記(7)式より、以下の式(8a)あるいは式(8b)なる関係が得られる。

$$\alpha_B \leq 0.021 \alpha \quad \dots (8a)$$

$$\alpha_B \leq 0.015 \alpha \quad \dots (8b)$$

上述のように、典型的には B i 系 E D F の背景損失  $\alpha_B$  は 2 d B / m 程度であるので、E r 本来の吸収ピーク  $\alpha$  は、95 d B / m 以上であるのが好ましく、143 d B / m 以上であるのがさらによい。なお、上記(8a)式及び(8b)式それぞ

れの右辺の係数は、想定される動作温度に応じて異なる場合があり得る。動作温度が低いと、これらの係数は大きくなる。

Bi系EDFの蛍光特性は石英系EDFの蛍光特性と異なることが知られている。特に、Bi系EDFの場合に波長1480nm付近に見られる蛍光特性の膨らみは、石英系EDFの場合には見られない特徴である。この特徴は、Bi系EDF中のB元素の組成量が多いときに顕著である。また、蛍光特性と吸収特性との間には相関があるので、Bi系EDFの場合には波長1480nm付近に吸収ピークがある筈である。

Cバンドの信号光を増幅する場合には、波長1.48μm帯の励起光の吸収効率が低いことは、励起効率の改善につながるので望ましい。しかしながら、Lバンドの信号光を増幅する場合には、使用する吸収条長積ピークが大きいので、励起光の吸収が信号光の利得と比較して大きすぎると、励起効率や雑音指数の劣化につながる。そこで、Bi系EDFを用いてLバンドの信号光を増幅する場合には、励起光波長は1.48μmより短波長であるのが好ましい。

図9は、励起光波長と利得との関係を示すグラフである。このグラフは、図6、図7A及び図7Bで説明されたBi系EDFに対して双方向から出力50mWの励起光をそれぞれ供給することにより得られた。入力信号光のチャネル波長は1565nmであり、パワーは-35dBmであった。励起光のチャネル波長は、1450nm～1500nmの範囲で変化させた。この図から分かるように、励起光波長が1460nm付近であるときに、利得は大きい。最も望ましい励起光波長は1463nm程度である。

ただし、最も望ましい励起光波長より実際の励起光波長がずれていたとしても、挿入損失が小さい光部品を利用することにより、この波長ずれに起因した悪影響を回復することができる。図4に示されたように、光増幅器が1段のBi系EDFのみで構成された場合、典型的には、Bi系EDFの入力側及び出力側それぞれに、モニタ用光カプラ、光アイソレータ、及び励起光供給用光カプラが挿入

される。これら個々の光部品につき、典型値より挿入損失を0.2 dB程度まで低減することができる。したがって、励起光波長に対する許容範囲は、図9に示された利得ピーク波長を中心波長として、その利得ピークより1.2 dB程度小さい利得となる波長範囲、すなわち、±10 nm程度の波長範囲となる。励起光波長の安定化のためには、レーザダイオードと共振グレーティングとの組合せからなる励起光源が適しており、また、共振グレーティングとして光ファイバに形成されたグレーティングを用いるのが安価である。

図10は、信号光波長と雑音指数との関係を示すグラフである。この図10において、グラフG810はBi系EDFの雑音指数、グラフG820はP共添加石英系EDFの雑音指数、グラフG830はP/A1共添加石英系EDFの雑音指数をそれぞれ示している。各EDFへのトータル入力信号光の光パワーは0 dBmであった。Bi系EDFは、図6、図7A及び図7Bで説明されたものであり、双方向より出力60 mWの励起光が供給された。P/A1共添加石英系EDFは、双方向より出力27 mWの励起光が供給された。P共添加石英系EDFは、順方向より出力100 mWの励起光が供給された。

この図から分かるように、P/A1共添加石英系EDFと比較すると、Bi系EDFの雑音指数は、短波長側で劣っており、波長1565 nm付近では1 dB以上劣っている。これは、Bi系EDFの内部の背景損失や石英系光ファイバとの融着接続損失が高いことに起因する。さらに、濃度消光の影響も懸念される。このように、石英系EDFと比較すると、Bi系EDFは、雑音指数や励起効率の点で劣っている。

このような事情を考慮すると、雑音指数を改善するには、石英系EDFは、光増幅器の入力端付近や、分散補償光ファイバ等の大きな挿入損失を有する光部品の直後に配置されるのが好ましい。また、励起効率を改善するには、石英系EDFは、光増幅器の出力端付近や、分散補償光ファイバ等の大きな挿入損失を有する光部品の直前に配置されるのが好ましい。

ただし、一般に用いられているA l 共添加石英系E D Fは、波長1 6 0 0 n mより長波長側で利得が急激に低下するので、B i 系E D Fの特徴である広帯域に亘って平坦な利得スペクトル形状を損なうことになる。そこで、長波長側でも利得を有するP / A l 共添加石英系E D Fを用いるのがよい。

5       また、上述のように、P / A l 共添加石英系E D Fの相対利得偏差は大きく、この点でP / A l 共添加石英系E D F単体では実用上問題がある。そこで、P /

A l 共添加石英系E D FとB i 系E D Fとを組み合わせる用いるのが好ましい。

なお、石英系E D Fの添加物としては、P元素に加えて、A l 元素及びL a 元素の少なくともいずれかが添加されるのが好ましい。仮に、A l 元素及びL a 元素  
10       のいずれも添加されていないと、図1 0に示されたように、1 0 0 m W順方向励起の場合であっても、雑音指数が著しく劣化する。なお、A l 元素とL a 元素以外としては、3 価の陽イオンとなる元素であれば、同様に機能すると思われる。

P / A l 共添加石英系E D Fの利得スペクトルと同等の利得スペクトルは、波長0 . 9 8  $\mu$  m帯の励起光への感度を向上させる働きを有するY b 元素をさらに  
15       共添加することでも実現できる。Y b 共添加は、特にクラッド励起などのように、大出力励起レーザを使用するときに適している。

以上のように、この発明に係る光増幅器1 0 0、2 0 0は、B i 系E D Fを光増幅媒体として用いることにより、熱損傷や毒性の問題が無く実用的であり、また、Lバンドに含まれる広帯域の実効的信号波長域で相対利得偏差を小さくする  
20       ことができる。この光増幅器1 0 0、2 0 0を含む光通信システム1は、Lバンドを用いて大容量の情報を送受信することができる。この発明に係る光増幅器1 0 0、2 0 0は、特にB i 系E D Fの反転分布、温度及び吸収条長積ピーク（Unsaturated Absorption Peak）を最適化することにより、広帯域の実効的信号波長域で相対利得偏差を確実に小さくすることができる。この発明に係る光増  
25       幅器1 0 0、2 0 0は、励起光波長を最適化することにより、励起効率を高くすることができる。また、B i 系E D Fに加えてP / A l 共添加石英系E D Fをも



用いることにより、雑音指数が優れたものとなる。

なお、この発明は、上述の実施例に限定されるものではなく種々の変形が可能である。例えば、光ファイバ伝送路や分散補償光ファイバにおいて多重化信号光をラマン増幅してもよく、この場合には、雑音指数が更に改善され得る。

5       なお、図 7 A 及び図 7 B に示されたように、 $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF は、多重化信号光が伝搬する光導波領域で生じる反転分布を最適化して平坦化された利得の大きさが、利得スペクトル形状を維持した状態で高温になるほど小さくなるという傾向を有する（記式 (4) 参照）。この式 (4) に示された関係を利用して以下のような制御方法を実現する光増幅器が得られる。

10       光通信システムでは、伝送用光ファイバ周辺の環境温度の変化などに起因して伝送路ロスが変動する、いわゆるスパンロス変動が懸念される。このとき、光増幅器は操作利得をスパンロスに合わせて変動させることが望ましい。

      このための制御方法としては、例えば図 1 1 に示された第 3 実施例に係る光増幅器 3 0 0 のように、入出力モニタの比率から動作利得の変動を検出し、蒸気式  
15       (4) に基づいて  $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF の温度を制御してもよい。多くの場合、光増幅器の出力は一定に保つ必要があり、出力モニタが一定になるように励起光パワーをフィードバック制御する制御部も併せて必要になる。なお、この場合、出力は一定であるので  $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF の温度制御は入力モニタの変動分に基づいて行ってもよい。

20       また、無中継通信システムのブースターアンプのように、入力レベルは一定に維持され、伝送路の状態次第で出力レベルのみは調整を要する場合、出力モニタの変動分のみに基づいた制御も可能である。

      なお、光ファイバネットワークでは、スパンロスだけでなく多重化された信号光のチャネル数が増加する場合も考えられる。この場合、入出力パワーをホットダイオードなどの受光素子でモニタするのみではスパンロス変動と信号チャネル数  
25       変動を混同する危険性がある。このため、図 1 2 に示された第 4 実施例に係る光

増幅器 400 のように、オプティカルパフォーマンスモニタ (OPM) を利用する制御形態や、図 13 に示された第 5 実施例に係る光増幅器 500 のように、ネットワーク全体を監視する上位監視システムからスパンロス量などの情報を得る制御形態が考えられる。

5 図 11 は、この発明に係る光増幅器における第 3 実施例の構成を示す図である。  
この図に示された光増幅器 300 は、入力端 301 から出力端 302 へ向かって

順に、光カップラ 311、光アイソレータ 321、光カップラ 313、Bi 系 EDF 330、光アイソレータ 323、光カップラ 314、Bi 系 EDF 330、光カップラ 315、光アイソレータ 322 及び光カップラ 312 を備える。また、この光増幅器 300 は、光カップラ 311 に接続された受光素子 351 (PD)、光カップラ 312 に接続された受光素子 352 (PD)、光カップラ 313 に接続された励起光源 353 (LD)、光カップラ 314 に接続された励起光源 354、光カップラ 315 に接続された励起光源 355、Bi 系 EDF 330 に接して又は近傍に配置された温度検出素子 361 (サーミスタ) 及び温度調整素子 362 (ペルチェ素子)、ならびに当該光増幅器 300 全体の動作をフィードバック制御する制御部 390 を備える。制御部 390 は、温度検出素子 361 からの検出情報に基づいて温度調節素子 362 を制御するための温度制御回路 391 を備えるとともに、より高速なフィードバック制御を可能にするため、予め実測データを格納しておくためのメモリ 392 を含む。

20 上記制御部 390 は、±1 dB 程度の高精度で利得平坦度を維持すべく、例えば以下のような制御を行う。すなわち、当該制御部 390 は、Bi 系 EDF 330 単体の 25℃ における動作利得の信号波長帯域内での極小値を  $G_{min}$  (dB と) するとき、

$$\begin{aligned} & (\Delta T \cdot G_{min}) \times 0.0036 - 1.2 \\ & \leq \Delta G \leq \\ & (\Delta T \cdot G_{min}) \times 0.0036 + 1.2 \end{aligned}$$

なる関係を満たすよう、上記Bi系EDFの温度変動量 $\Delta T$  (K)を調節する。このとき、制御部390のメモリ392もは、より高速な利得平坦制御を可能にすべく、当該光増幅器300の実際の運用時における $\Delta G$  (dB)と $\Delta T$  (K)の実測データが格納される。

5        また、図12は、この発明に係る光増幅器における第4実施例の構成を示す図である。この図に示された光増幅器400は、入力端401から出力端402へ向かって順に、光カップラ411、光アイソレータ421、光カップラ413、Bi系EDF430、光アイソレータ423、光カップラ414、Bi系EDF430、光カップラ415、光アイソレータ422及び光カップラ412を備える。また、この光増幅器400は、光カップラ411に接続された受光素子451 (PD)、光カップラ412に接続されたオプティカルパフォーマンスモニタ460 (OPM)、光カップラ413に接続された励起光源453 (LD)、光カップラ414に接続された励起光源454、光カップラ415に接続された励起光源455、Bi系EDF430に接して又は近傍に配置された温度検出素子461 (サーミスタ)及び温度調整素子462 (ペルチェ素子)、ならびに当該光増幅器400全体の動作を制御する制御部490を備える。制御部490は、温度検出素子461からの検出情報に基づいて温度調節素子462をフィードバック制御するための温度制御回路491を備えるとともに、より高速なフィードバック制御を可能にするため、予め実測データを格納しておくためのメモリ492を含む。

20        さらに、図13は、この発明に係る光増幅器における第5実施例の構成を示す図である。この図に示された光増幅器500は、入力端501から出力端502へ向かって順に、光カップラ511、光アイソレータ521、光カップラ513、Bi系EDF530、光アイソレータ523、光カップラ514、Bi系EDF530、光カップラ515、光アイソレータ522及び光カップラ512を備える。また、この光増幅器500は、光カップラ511に接続された受光素子551 (PD)、光カップラ512に接続された受光素子552 (PD)、光カップラ513に接続さ

れた励起光源 5 5 3 (LD)、光カプラ 5 1 4 に接続された励起光源 5 5 4、光  
カプラ 5 1 5 に接続された励起光源 5 5 5、Bi 系 EDF 5 3 0 に接して又は近  
傍に配置された温度検出素子 5 6 1 (サーミスタ) 及び温度調整素子 5 6 2 (ペ  
ルチェ素子)、ならびに当該光増幅器 5 0 0 全体の動作をフィードバック制御す  
5 る制御部 5 9 0 を備える。さらに、この光増幅器 5 0 0 は、外部伝送路を伝搬す  
る光を光カプラ 5 6 1、5 6 2 を介してモニタし、スパンロス量などの情報を得

るための上位監視システム 5 6 3 を備える。制御部 5 9 0 は、温度検出素子 5 6  
1 からの検出情報に基づいて温度調節素子 5 6 2 を制御するための温度制御回路  
5 9 1 を備えるとともに、より高速なフィードバック制御を可能にするため、予  
め実測データを格納しておくためのメモリ 5 9 2 を含む。

上述のような制御形態では、どの程度の精度でEr 添加 Bi 系 EDF の温度を  
制御すればよいかは工業的には重要である。通常の陸上光通信システムでは、1  
つの増幅用中継局に要求される利得偏差は一般的に最大±1 dB である。図 1 4  
のグラフから分かるように、パスバンド 1 5 6 3 nm ~ 1 6 1 5 nm において±  
1 dB の利得偏差を満たすためには $G_{min}$  (Bi 系 EDF 単体の 2 5 °C における  
15 利得極小値) を 1. 2 dB の精度で制御する必要がある。

なお、図 1 4 は、室温における信号光波長と規格化された動的利得傾斜 (DGT)  
との関係を示すグラフである。規格化された DGT は以下の式 (9) により与  
えられる。

$$(\Delta G - \Delta G_M) / \Delta G_M \quad \dots (9)$$

ここで、 $\Delta G$  は DGT であり、 $\Delta G_M$  はパスバンド全域で平均化された利得 $G_M$   
の変動分である。

図 1 4 から、パスバンド 1 5 6 3 nm ~ 1 6 1 5 nm において発生する規格化  
された DGT は 1. 7 dB<sub>p-p</sub> である。これを±1 dB (つまり 2 dB<sub>p-p</sub>) の  
25 範囲内に収めるためには、 $\Delta G_{min}$  を±(2 / 1. 7)、すなわち±1. 2 dB  
の精度で制御しなければならないことが分かる。

なお、以上のような演算を行ってE r 添加B i 系E D Fの温度を制御すると、高速な制御が難しい。このような場合、上述の第3～第5実施例のように、当該光増幅器の出荷時や初期敷設時に、動作利得とE r 添加B i 系E D Fの温度の最適地との関係を実際に測定しておき、制御部内のメモリに予め格納しておくのが好ましい。

さらには、動作利得が不明であっても利得傾斜を検出し、E r 添加B i 系E D Fの温度をフィードバック制御することも可能である。すなわち、図15に示された第6実施例のように、信号出力スペクトルをオプティカルパフォーマンスモニタ（OPM）でモニタすることによりその利得傾斜を検出し、正の利得傾斜のときにはE r 添加B i 系E D Fを温める一方、負の利得傾斜のときにはE r 添加B i 系E D Fを冷却するよう、フィードバック制御すれば出力スペクトルを常に平坦に保つことができる。なお、E D F Aの場合、図16に示されたように、最低限、あるチャネルの信号レベルやA S Eをモニタすれば、同じ効果が得られる。ただし、チャネルの信号レベルをモニタする場合にはA D Mの導入によりモニタ中のチャネルが消える可能性があることに注意する必要がある。図16中のエリアAは、信号レベルのモニタ範囲を示し、エリアBはA S Eのモニタ範囲を示す。

図15は、この発明に係る光増幅器における第6実施例の構成を示す図である。この図に示された光増幅器600は、入力端601から出力端602へ向かって順に、光カップラ611、光アイソレータ621、光カップラ613、B i 系E D F 630、光アイソレータ623、光カップラ614、B i 系E D F 630、光カップラ615、光アイソレータ622及び光カップラ612を備える。また、この光増幅器600は、光カップラ611に接続された受光素子651（PD）、光カップラ612に接続されたオプティカルパフォーマンスモニタ660（OPM）、光カップラ613に接続された励起光源653（LD）、光カップラ614に接続された励起光源654、光カップラ615に接続された励起光源655、B i 系E D F

430に接して又は近傍に配置された温度調整素子662（ペルチェ素子）、ならびに当該光増幅器600全体の動作を制御する制御部690を備える。制御部690は、温度調節素子662をフィードフォワード制御するための温度制御回路691を備えるとともに、より高速なフィードバック制御を可能にするため、  
5 予め実測データを格納しておくためのメモリ692を含む。

なお、光通信システムでは、中継局内の温度変化などによりEr添加Bi系EDFの温度が変動してしまう可能性があり、図5（a）に示されたような現象は利得傾斜の発生原因となり得る。このような場合、例えば図11に示された第3実施例のように、サーミスタとペルチェ素子の組み合わせによりEr添加Bi系EDFの温度を安定化させる方法が考えられる。ただし、他の方法としては、図17の第7実施例に係る光増幅器のように、透過スペクトルが可変な光学デバイスを利用する制御形態が考えられる。このように透過スペクトルが可変な光学デバイスとしては、例えば可変減衰器などがある。

なお、図17は、この発明に係る光増幅器における第7実施例の構成を示す図である。この図に示された光増幅器700は、入力端701から出力端702へ向かって順に、光カップラ711、光アイソレータ721、光カップラ713、Bi系EDF730、光アイソレータ723、可変減衰器760、光アイソレータ724、光カップラ714、Bi系EDF730、光カップラ715、光アイソレータ722及び光カップラ712を備える。また、この光増幅器700は、光カップラ711に接続された受光素子751（PD）、光カップラ712に接続されたオプ受光素子752（PD）、光カップラ713に接続された励起光源753（LD）、光カップラ714に接続された励起光源754、光カップラ715に接続された励起光源755、Bi系EDF730に接して又は近傍に配置された温度検出素子461（サーミスタ）、ならびに当該光増幅器700全体の動作を制御する制御部790を備える。制御部790は、温度検出素子761からの検出情報に基づいて可変減衰器760をフィードバック制御するための可変ATT制御回路791

を備えるとともに、より高速なフィードバック制御を可能にするため、予め実測データを格納しておくためのメモリ 792を含む。

この第7実施例に係る光増幅器 700において、制御部 790は、Er 添加 Bi 系 EDF 730の温度が高まれば可変減衰器 760の光減衰量を高める一方、  
5 該Er 添加 Bi 系 EDF 730の温度が下がれば可変減衰器 760の光減衰量を下げるよう制御する。また、メモリ 792に実測データを格納しておけばより高速な制御が可能になる。

上述の制御では、光増幅器の利得変動とEr 添加 Bi 系 EDFの温度変動をそれぞれ個別に扱ったが、実際の光通信システムでは両者が同時に変動する場合は  
10 考えられる。この場合、両方の変動を可変減衰器のみで補償しようとする損失が大きくなりすぎ励起効率や雑音指数が劣化する可能性もある。その一方で、Er 添加 Bi 系 EDFの温度のみで補償しようとしてもペルチェ素子やヒーターで変更可能な温度範囲は有限である。現実的には、図18に示された第8実施例に係る光増幅器 800のように、Er 添加 Bi 系 EDF 830の温度制御と可変減  
15 衰器 860の光減衰量制御の併用が多くなると考えられる。この第8実施例に係る光増幅器 800は、動作利得の変動量 $\Delta G$ 、Er 添加 Bi 系 EDF 830の温度変動量 $\Delta T$ 、及び可変減衰器 860のロス変動量 $\Delta A$ の関係を最適に保つよう演算しながら $\Delta A$ 、あるいは $\Delta A$ と $\Delta T$ を算出する制御形態が考えられる。

図18は、この発明に係る光増幅器における第8実施例の構成を示す図である  
20 。この図に示された光増幅器 800は、入力端 801から出力端 802へ向かって順に、光カップラ 811、光アイソレータ 821、光カップラ 813、Bi 系 EDF 830、光アイソレータ 823、可変減衰器 860、光アイソレータ 824、光カップラ 814、Bi 系 EDF 830、光カップラ 815、光アイソレータ 822及び光カップラ 812を備える。また、この光増幅器 800は、光カップラ 811に  
25 接続された受光素子 851 (PD)、光カップラ 812に接続された受光素子 852 (PD)、光カップラ 813に接続された励起光源 853 (LD)、光カップラ 8

14に接続された励起光源854、光カプラ815に接続された励起光源855、Bi系EDF830に接して又は近傍に配置された温度検出素子861（サーミスタ）及び温度調整素子862（ペルチェ素子）、ならびに当該光増幅器800全体の動作を制御する制御部890を備える。制御部890は、温度検出素子861からの検出情報に基づいて温度調節素子862をフィードバック制御するとともに可変減衰器860も同時にフィードバック制御するための可変ATT／温度制御回路891と、より高速なフィードバック制御を可能にするため、予め実測データを格納しておくためのメモリ892を備える。

なお、利得平坦度を±1 dBの高精度で維持するためには、上記制御部は、光増幅モジュールにおけるBi系光導波路単体の25℃における動作利得の信号波長帯域内での極小値を $G_{min}$  (dB) とするとき、可変減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) が

$$-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T - 1.2 \\ \leq \Delta A \leq$$

$$-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T + 1.2$$

なる関係を満たすよう、上記温度変化 $\Delta T$  (K) に基づいて、可変減衰器を制御する。

さらに、上記制御部は、光増幅モジュールにおけるBi系光導波路単体の25℃における動作利得の信号波長帯域内での極小値を $G_{min}$  (dB) とするとき、可変減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) が

$$-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T - \Delta G - 1.2 \\ \leq \Delta A \leq$$

$$-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T - \Delta G + 1.2$$

なる関係を満たすよう、該光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB) 及び温度変化 $\Delta T$  (K) に基づいて、可変減衰器を制御してもよい。また、この第8実施例においても、メモリ892に実測データを格納しておけばより



高速な制御が可能になる。

先に述べたように、拡張Lバンド用Bi系EDFの雑音指数は必ずしも量子限界まで達していない。このため、ラマン増幅器と当該各実施例に係る光増幅器とを組み合わせることにより、より雑音指数を改善するのが好ましい。この事実を  
5 検証するため、図19A及び図19Bにそれぞれ示された構成の光通信システムが用意された。図19Aに示された光通信システムは、長さ80kmの伝送路フ

ァイバ900 (SMF: Single-Mode Fiber) とこの発明に係るEr添加Bi系EDFを含む光増幅器 (Bi-EDFA) 910と、利得等化器920により構成されている。図19Bに示された光通信システム (この発明に係る光通信システム  
10 の第2実施例) は、上記とを組み合わせた光通信システムと、図19Bに示された光通信システムは、図19Aの光通信システムと同様に、長さ80kmのSMF900と、Bi-EDFA920と、利得等化器920を備えるとともに、光カプラ930を介して複数チャネルの励起光をSMF900へ供給する励起光供給システム940をさらに備えることにより、該Bi-EDFAの上流側に分  
15 布ラマン増幅器を構成している。なお、図19Bの光通信システムにおいて、励起光供給システム940は、励起チャネルとして、波長1468nm、出力166mWの光を出力する光源942aと、励起チャネルとして、波長1472nm、出力269mWの光を出力する光源942bと、励起チャネルとして、波長1520nm、出力75mWの光を出力する光源942cと、励起チャネルとして  
20 、波長1524nm、出力210mWの光を出力する光源942dと、これら光源942a～942dそれぞれから出力された励起チャネルを合波する合波器941を備える。

また、図20Aは、信号光波長と利得の関係を示すグラフであり、図20Bは、信号光波長と雑音指数 (NF: Noise Figure) の関係を示すグラフである。

25 なお、図20Aにおいて、グラフG1810aは図19Aに示された光通信システムにおけるBi-EDFAの利得スペクトル、グラフG1821aは図19

Bに示された光通信システムにおける分布型ラマン増幅器のON-OFF利得、  
グラフ1822aは図19Bに示された光通信システムにおけるBi-EDFA  
単体の利得スペクトル、グラフG1823aは図19Bに示された光通信システム  
全体のトータル利得をそれぞれ示している。さらに、図20Bにおいて、グラ  
フG1810bは図19Aに示された光通信システムにおけるBi-EDFAの  
利得スペクトル、グラフ1821bは図19Bに示された光通信システムにおけ  
る分布型ラマン増幅器のON-OFF利得、グラフG1822bは図19Bに示  
された光通信システムにおけるBi-EDFA単体の利得スペクトル、グラフG  
1823bは図19Bに示された光通信システム全体のトータル利得をそれぞれ  
示している。

図19Aの光通信システムでは1563nm～1615nmの信号波長帯域に  
おける拡張LバンドEDFA単体の雑音指数は8dBに達しているのに対し、図  
19Bの光通信システム（分布型ラマン増幅器含む）では、実効的な雑音指数は  
4dB以下となる。また、利得偏差は、図19Aの光通信システムが3dBに達  
するのに対し、図19Bの光通信システムは2dBに改善される。このように、  
当該光増幅器のみならず、該光増幅器の上流側に位置する光ファイバ伝送路をラ  
マン増幅用光ファイバとして利用することにより雑音指数の改善が可能になる。

以上のようにこの発明によれば、光増幅媒体としてBi系光導波路を利用する  
ことにより、熱損傷や毒性の問題が無く実用的であり、また、Lバンドに含まれ  
るより広帯域の実効的信号波長域において相対利得偏差の小さい利得スペクトル  
が実現できる。

クレーム：

1. 波長1610nm以上の波長域を含む信号光波長帯域内の複数チャネルが多重化された信号光を一括増幅する光増幅モジュールであって、

前記信号光が伝搬する領域であってEr元素が添加された光導波領域を有し、

5 酸化Bi系ホストガラスからなるBi系光導波路と、

前記Bi系光導波路の光導波領域内に反転分布を生じさせるよう、該光導波領域に励起光を供給する励起光供給システムとを備えた光増幅モジュール。

2. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、

Er元素が添加された前記光導波領域には、B元素がさらに添加されている。

10 3. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、

当該光増幅モジュールの動作温度範囲のうち所定動作温度において前記Bi系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満になるよう、前記励起光供給システムから前記Bi系光導波路に供給される励起光の光パワーを調整する制御部を備える。

15 4. クレーム3の光増幅モジュールにおいて、

前記相対利得偏差は、19%未満である。

5. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、

当該光増幅モジュールの全動作温度範囲内において前記Bi系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満になるよう、前記励起光供給システムから前記Bi系光導波路に供給される励起光の光パワーを調整する制御部を備える。

20 6. クレーム5の光増幅モジュールにおいて、

前記相対利得偏差は、19%未満である。

7. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、

25 当該光増幅モジュールの全動作温度範囲内において前記Bi系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満となる波長帯域幅が37nm

を越えるよう、前記励起光供給システムから前記B i 系光導波路に供給される励起光の光パワーを調整する制御部を備える。

8. クレーム7の光増幅モジュールにおいて、  
前記波長帯域幅は、50nmを越える。

5 9. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、

当該光増幅モジュールの全動作温度範囲内において前記B i 系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が19%未満となる波長帯域幅が37nmを越えるよう、前記励起光供給システムから前記B i 系光導波路に供給される励起光の光パワーを調整する制御部を備える。

10 10. クレーム9の光増幅モジュールにおいて、  
前記波長帯域幅は、50nmを越える。

11. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、  
前記B i 系光導波路又はその近傍の温度を検出する温度検出素子を備える。

15 12. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、  
前記B i 系光導波路又はその近傍の温度を調整する温度調整素子を備える。

13. 請求項12記載の光増幅モジュールと、  
前記光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB)に基づいて、該光増幅モジュールのB i 系光導波路又はその近傍の温度を $\Delta T$  (K)だけ変化させる制御部とを備えた光増幅器。

20 14. クレーム13の光増幅器において、  
前記制御部は、前記B i 系光導波路単体の25℃における動作利得の信号波長帯域内での極小値を $G_{min}$  (dBと)するとき、

$$(\Delta T \cdot G_{min}) \times 0.0036 - 1.2 \\ \leq \Delta G \leq$$

25  $(\Delta T \cdot G_{min}) \times 0.0036 + 1.2$

なる関係を満たすよう、上記 $\Delta T$  (K)を制御する。

15. クレーム13の光増幅器において、  
前記制御部は、当該光増幅器の実際の運用時における $\Delta G$  (dB) と $\Delta T$  (K)  
) の実測データを、予め格納したメモリを備える。

16. 請求項12記載の光増幅モジュールと、  
5 検出された利得傾斜に基づいて、前記Bi系光導波路又はその近傍の温度を変  
化させる制御部を備えた光増幅器。

17. 請求項12記載の光増幅モジュールと、  
前記信号光の伝送経路上に設けられ、前記信号光に対する損失特性が可変である  
可変減衰器と、  
10 検出された前記光増幅モジュールにおける利得傾斜が正のときに前記光増幅モ  
ジュールのBi系光導波路に対する加熱指示を行う一方、検出された前記光増幅  
モジュールにおける利得傾斜が負のときに前記光増幅モジュールのBi系光導波  
路に対する冷却指示を行う制御部とを備えた光増幅器。

18. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、  
15 前記信号光の伝送経路上に設けられ、前記信号光に対する損失特性が可変であ  
る光損失部品を備える。

19. クレーム18の光増幅モジュールにおいて、  
前記光損失部品は可変光減衰器を含む。

20. 請求項19記載の光増幅モジュールと、  
20 検出された前記光増幅モジュールのBi系光導波路又はその近傍の温度変化 $\Delta$   
T (K) に基づいて、前記光増幅モジュールの可変光減衰器における光減衰量 $\Delta$   
A (dB) を決定する制御部とを備えた光増幅器。

21. クレーム13の光増幅器は、さらに、  
前記信号光の伝送経路上に設けられ、前記信号光に対する損失特性が可変であ  
25 る可変減衰器をさらに備え、  
前記制御部は、前記可変減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) が検出された前

記温度変化 $\Delta T$  (K) に比例するよう、該可変減衰器を制御する。

22. クレーム13の光増幅器は、さらに、

前記信号光の伝送経路上に設けられ、前記信号光に対する損失特性が可変である可変減衰器をさらに備え、

5 前記制御部は、前記光増幅モジュールにおけるBi系光導波路単体の25℃における動作利得の信号波長帯域内での極小値を $G_{min}$  (dB) とするとき、前記

可変減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) が

$$-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T - 1.2$$

$$\leq \Delta A \leq$$

10  $-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T + 1.2$

なる関係を満たすよう、前記温度変化 $\Delta T$  (K) に基づいて、前記可変減衰器を制御する。

23. クレーム20の光増幅器において、

前記制御部は、前記光増幅モジュールにおけるBi系光導波路単体の25℃における動作利得の信号波長帯域内での極小値を $G_{min}$  (dB) とするとき、前記  
15 可変減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) が

$$-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T - \Delta G - 1.2$$

$$\leq \Delta A \leq$$

$$-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T - \Delta G + 1.2$$

20 なる関係を満たすよう、前記光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB) 及び温度変化 $\Delta T$  (K) に基づいて、前記可変減衰器を制御する。

24. クレーム20の光増幅器において、

前記制御部は、前記光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB) 及び温度変化 $\Delta T$  (K) の、当該光増幅器の実際の運用時における実測データを  
25 、予め格納したメモリを備える。

25. クレーム20の光増幅器において、

前記制御部は、前記光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB)、温度変化 $\Delta T$  (K) 及び前記可変光減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) の、当該光増幅器の実際の運用時における実測データを、予め格納したメモリを備える。

5        26. クレーム19の光増幅モジュールと、

検出された前記光増幅モジュールにおける利得傾斜に基づき、前記可変減衰器の光減衰量 $\Delta A$  (dB) を変化させる制御部を備えた光増幅器。

27. 前記信号光の伝送経路上に設けられ、前記信号光に対する損失特性が可変である可変減衰器を有する、請求項12記載の光増幅モジュールと、

10        検出された前記光増幅モジュールにおける利得傾斜が正のときに前記可変減衰器の光減衰量 $\Delta A$  (dB) の増加指示を行う一方、検出された前記光増幅モジュールにおける利得傾斜が負のときに前記可変減衰器の光減衰量 $\Delta A$  (dB) の減少指示を行う制御部とを備えた光増幅器。

28. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、

15        前記B i 系光導波路の背景損失  $\alpha_B$  (dB/m) と $E_r$ による吸収ピーク  $\alpha$  (dB/m) との間に以下の関係が成り立つ。

$$\alpha_B \leq 0.021 \alpha$$

29. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、

20        前記B i 系光導波路の背景損失  $\alpha_B$  (dB/m) と $E_r$ による吸収ピーク  $\alpha$  (dB/m) との間に以下の関係が成り立つ。

$$\alpha_B \leq 0.015 \alpha$$

30. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、

前記B i 系光導波路は、光ファイバを含む。

31. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、

25        前記励起光供給システムは、中心出力波長が最高出力時に1453nm～1473nmの範囲にある光源を含む。

32. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、  
前記励起光供給システムは、中心出力波長が常時1453nm～1473nm  
の範囲にある光源を含む。

5 33. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、  
前記励起光供給システムは、  
光反射面と該光反射面と対向する光出射面とを有する半導体発光素子と、

前記半導体発光素子の光出射面から出射された光のうち特定波長の光の一部を  
反射し、該反射された光を前記光出射面から前記半導体発光素子の内部へ入射さ  
せる回折格子とを含む。

10 34. クレーム33の光増幅モジュールにおいて、  
前記回折格子は、光ファイバ上に形成された光ファイバグレーティングを含む。

35. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、  
前記信号光が伝搬する領域であってEr元素が添加された光導波領域を有し、  
石英系ホストガラスからなる石英系光導波路を備える。

15 36. クレーム35の光増幅モジュールにおいて、前記石英系光導波路は、  
前記信号光の伝送経路上であって該信号光の進行方向から見て前記Bi系光導波  
路の上流側に配置された

37. クレーム35の光増幅モジュールにおいて、  
前記石英系光導波路は、前記信号光の伝送経路上であって該信号光の進行方向  
20 から見て前記Bi系光導波路の下流側に配置されている。

38. クレーム35の光増幅モジュールにおいて、  
前記石英系光導波路の光導波領域には、Al元素及びLa元素の少なくとも一  
方とP元素とが共添加されている。

39. クレーム1の光増幅モジュールを含み、Lバンドに含まれる複数チャ  
25 ネルが多重化された信号光を前記光増幅モジュールにより増幅する光増幅器。

40. クレーム39の光増幅器は、さらに、



前記信号光の伝送経路上であって該信号光の進行方向から見て前記B i 系光導波路の上流側に配置されたラマン増幅用光ファイバを備える。

4 1. クレーム4 0の光増幅器において、

前記ラマン増幅用光ファイバには、波長1 4 7 0 n m付近の励起光及び波長1  
5 5 2 0 n m以上の励起光の少なくとも一方が供給される。

4 2. クレーム3 9記載の光増幅器を含み、Lバンドに含まれる複数チャネルが多重化された信号光を伝送するとともに、該信号光を前記光増幅器により増幅する光通信システム。

4 3. クレーム4 2の光通信システムは、さらに、

10 前記信号光の伝送経路上であって該信号光の進行方向から見て前記光増幅器の上流側に配置されたラマン増幅用光ファイバを備える。

4 4. クレーム4 3の光通信システム部において、

前記ラマン増幅用光ファイバには、波長1 4 7 0 n m付近の励起光及び波長1  
5 5 2 0 n m以上の励起光の少なくとも一方が供給されることを特徴とする請求項  
15 5 2記載の光通信システム。

開示内容の要約

この発明は、Lバンドにおいて相対利得偏差の小さい広帯域利得スペクトルを実現する実用的な光増幅モジュール等に関する。励起光源からの励起光は、光カプラを経て、Bi系EDFへ供給される。入力端を介して入力されたLバンドの多重化信号光は、光カプラ、光アイソレータ及び光カプラを経てBi系EDFに到達し、該Bi系EDFにおいて一括増幅される。Bi系EDFにおいて増幅された多重化信号光は、光カプラ、光アイソレータ及び光カプラを経て出力端から出力される。